

王旭, 李聪, 张万刚, 等. 脂肪对不同熟化温度下乳化肠挥发性成分的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 43-53. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120177

WANG Xu, LI Cong, ZHANG Wangang, et al. Effects of Fat on Volatile Components of Emulsified Sausage at Different Cooking Temperatures[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 43-53. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120177

· 研究与探讨 ·

脂肪对不同熟化温度下乳化肠挥发性成分的影响

王旭¹, 李聪², 张万刚¹, 王颖², 徐宝才^{1,2,*}

(1.南京农业大学食品科技学院, 江苏南京 210095;

2.合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:为明确脂肪对不同熟化温度下(80 °C, 30 min、90 °C, 30 min、100 °C, 30 min 和 121 °C, 20 min)猪肉乳化香肠挥发性物质的影响, 采用感官评价、电子鼻(Electronic nose, E-nose)和固相微萃取-气相色谱质谱联用技术(Solid-phase microextraction coupled-gas chromatography-mass spectrometry, SPME-GC-MS)对添加或不添加脂肪的乳化肠在不同熟化温度下挥发性物质进行分析。结果表明, 添加脂肪的乳化肠, 熟化条件为 100 °C, 30 min 的样品风味最好, 添加脂肪可提高乳化肠脂香味、硫磺味、哈喇味和青草味的感官强度, 抑制高温乳化肠肉香味和蘑菇味的感官强度; 电子鼻能有效区分添加脂肪或不添加脂肪的样品, 但 80 °C, 30 min 组的样品无法有效区分; 添加脂肪的样品中, 除 100 °C, 30 min 组和 121 °C, 20 min 组外, 电子鼻能很好的将不同熟化温度的样品区分开。SPME-GC-MS 结果显示, 8 个处理组共检测出 56 种挥发性化合物, 己醛、庚醛、辛醛、戊醛、壬醛、1-辛烯、1-辛烯-3-醇和甲硫醇等关键化合物的含量随熟化温度的升高而增加。偏最小二乘判别分析(Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)筛选出己醛、戊醛和 n-己酸乙酯是不同熟化温度乳化肠气味差异的潜在标志物。采用正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)筛选出添加与不添加脂肪的样品在 4 种熟化温度下的差异化合物分别为 17 种、17 种、22 种和 25 种。以上结果表明, 熟化条件相同, 添加脂肪的样品挥发性物质含量显著高于不添加脂肪的样品, 100 °C, 30 min 的熟化条件更有利于乳化肠风味的形成。

关键词:乳化肠, 熟化温度, 脂肪, 挥发性风味物质, 偏最小二乘判别分析(PLS-DA)

中图分类号: TS251.65

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)24-0043-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120177



本文网刊:

Effects of Fat on Volatile Components of Emulsified Sausage at Different Cooking Temperatures

WANG Xu¹, LI Cong², ZHANG Wangang¹, WANG Ying², XU Baocai^{1,2,*}

(1.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2.College of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The sensory evaluation, electronic nose (E-nose), and solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS) were used to analyze the emulsified sausages (with or without fat addition) volatiles at different cooking temperatures (80 °C, 30 min, 90 °C, 30 min, 100 °C, 30 min and 121 °C, 20 min), which aimed to clarify the effect of fat on the pork emulsified sausages volatiles at different cooking temperatures. Results showed that, the fat additional sausages had outstanding flavor when cooking at 100 °C for 30 min. The fat addition improved the sensory intensity of the fat fragrance, sulfurous, rancid, and green fragrance while inhibiting the meat and mushroom flavor of

收稿日期: 2022-12-21

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2021YFD2100803); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(JZ2022HGTB0263, JZ2023HGQA0116)。

作者简介: 王旭(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: wangxu@163.com。

* 通信作者: 徐宝才(1972-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉制品加工与质量控制, E-mail: baocai@163.com。

emulsified sausages at high temperatures. The E-nose could effectively distinguish sausages with or without fat supplementation, in which the samples (80 °C, 30 min) was not suitable for the method. On the other hand, e-nose was preferable to distinguish the cooking temperature difference sausages except for samples cooked at 100 °C for 30 min and 121 °C for 20 min. SPME-GC-MS indicated 56 volatile compounds detected from eight treatment groups. Several vital compounds, including hexanal, heptanal, octanal, pentanal, nonanal, 1-octene, 1-octen-3-ol, and methanethiol were found to increase with the cooking temperature. PLS-DA identified hexanal, pentanal, and n-hexanoic acid vinyl ester as potential markers of odor differences in sausages at different cooking temperatures. Moreover, OPLS-DA obtained 17, 17, 22, and 25 compounds from sausages (with or without fat addition) cooking at four kinds of temperatures respectively. In conclusion, fat addition significantly increased the content of volatiles in sausages under the same cooking condition, and cooking at 100 °C for 30 min was more beneficial to the formation of sausage flavor.

Key words: emulsified sausage; cooking temperature; fat; volatile flavor substance; PLS-DA

乳化肠是将原料肉经过绞碎、斩拌、灌装等工艺加工而成的西式肉糜制品^[1],因其味道鲜美,便于携带而受到广大消费者的喜爱。乳化肠根据热加工温度可以分为低温乳化肠(中心温度为68~75 °C)^[2]、中温乳化肠(90~110 °C)^[3]和高温乳化肠(115~121 °C)^[4]。低温乳化肠具有营养价值高、易消化等优点,但货架期较短,全程需冷链,流通成本较高;中温乳化肠可以在常温下流通和贮存,同时很大程度上避免了乳化肠的风味、营养品质被破坏,但货架期比高温乳化肠短;高温乳化肠虽然货架期长,但产品品质下降显著、风味损失较大。熟化温度对乳化肠的风味有较大影响,采用低温熟化的乳化肠因受热温度低,美拉德反应不充分,呈香物质较少,具有香气不足的缺点^[5];采用高温熟化的乳化肠呈香物质多,但易产生高温蒸煮味等不良风味。目前,艾婷等^[4]研究了不同杀菌条件对乳化肠挥发性风味物质的变化规律,发现随着杀菌温度的升高可能产生具有“高温味”的物质。任晶晶^[6]研究添加抗性淀粉的低盐低脂乳化肠在不同蒸煮温度下的风味变化,发现高温蒸煮的乳化肠挥发性化合物的含量显著增加。

风味是决定肉和肉制品质量以及消费者偏好的重要感官属性之一。研究表明,脂肪作为肉制品风味形成的重要物质,主要发挥两大作用:一是作为肉类食品的重要风味前体物质,通过水解、氧化或与其他化合物进一步发生酯化、美拉德反应等形成各种风味化合物;二是作为风味化合物的溶剂,在风味化合物形成过程中为积蓄风味物质提供场所^[7]。朱文政等^[8]研究了两种不同肥瘦比的狮子头挥发性风味物质的变化情况,发现7:3比例的狮子头风味优于6:4比例的狮子头;Zhao等^[9]发现中式干香肠中的风味物质主要来源于脂肪的氧化和水解,中性脂肪、游离脂肪酸和磷脂的变化可以反映脂肪氧化和水解的程度,对风味有显著影响。

综上所述,熟化温度和脂肪都会对肉制品的风味形成产生显著影响,然而,脂肪在不同熟化温度下对肉制品风味的影响却鲜有报道。为开发香气充足,无明显不良风味的乳化肠,本实验以猪肉乳化肠为研究对象,采用感官评价、电子鼻和固相微萃取-气相色谱

质谱联用技术对添加或不添加脂肪的乳化肠在不同熟化温度下挥发性物质进行分析,为优化熟化参数,进一步调整不同熟化温度下的脂肪添加量以改善乳化肠的风味提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪里脊肉、猪背膘 江苏省南京市雨润食品集团;食盐等辅料 江苏南京苏果超市;邻氯二苯 色谱纯,阿拉丁(上海)试剂有限公司;正己烷 色谱纯,德国默克公司。

PEN3型电子鼻 德国 AIRSENSE; PD500-TP 高速匀浆机 英国 Prima 公司; TSQ9000 气相色谱三重四级杆质谱 美国 Thermo Fisher 公司; 30/50 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取针 美国 Sigma Aldrich 公司; HM100 绞肉机 德国 IKA 公司; SM 45 STL 斩拌机 德国 K+G WETTER GmbH 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 实验分组 共制作8组乳化肠,每组乳化肠按照相同的生产工艺制备3个批次。设置不添加脂肪(C组)和添加脂肪(F组)两个水平;熟化条件设置4个水平:80、90、100、121 °C^[1]。C组和F组乳化肠经80、90、100和121 °C熟化处理后的样品分别标记为C1、C2、C3、C4和F1、F2、F3、F4。

1.2.2 乳化肠的制备 乳化肠配方及制作流程参考王春晓等^[10]的研究略做修改,配方、工艺流程及操作要点如下:

工艺流程:原料肉的选择→绞肉→斩拌→灌装→打卡→蒸煮→冷却→成品

乳化肠配方:猪里脊肉和猪肥膘的比例为7:3,C组原料肉为猪里脊肉,不添加猪背膘。冰水添加量为肉质量的30%,以猪里脊、猪肥膘、冰水质量之和为总物料质量,食盐添加量是总物料质量的1.4%,三聚磷酸钠添加量为总物料质量的0.4%。肠衣为直径5 cm的塑料肠衣。

操作要点:剔除原料肉中肉眼可见的筋膜,肥肉和瘦肉分别用绞肉机绞成肉馅。将瘦肉、食盐、三聚磷酸盐、1/3冰水放入斩拌机中,以3000 r/min斩拌

1.5 min, 暂停 2 min; 再加入肥肉、1/3 冰水以 3000 r/min 斩拌 1.5 min, 暂停 2 min, 加入 1/3 冰水以 3000 r/min 斩拌 1.5 min。将斩拌好的肉糜灌装成长度为 10 cm 左右的乳化肠。

乳化肠的熟化温度设置为 80、90、100、121 °C, 前三组样品的熟化时间均为 30 min。乳化肠熟化时间以产品中心温度达到蛋白的变性温度同时维持 10 min 以上^[1], 根据前期的工艺条件摸索, 30 min 的熟化时间即可满足。同时, 根据目前工业生产的实际情况, 121 °C 组的熟化时间设置为 20 min^[4]。

1.2.3 感官分析 采用定量描述性分析检验法(Quantitative descriptive analysis, QDA)进行评价, 挑选 10 名(5 名男性, 5 名女性)实验室感官人员组成感官评价小组。根据 Byrne 等^[11]对猪肉风味的描述并结合评价小组人员的讨论, 形成乳化肠感官属性描述词, 最终确定感官属性描述词为: 肉香味、脂香味、硫磺味、哈喇味、蘑菇味、青草味。各属性使用 15 cm 的标尺进行打分, 起点和终点分别位于距离直线两端 1.5 cm 处, 从左向右强度依次增加。实验重复 3 次。

1.2.4 电子鼻分析 参考 Han 等^[12]的方法略作修改, 称取 3.00 g 样品转移到 20 mL 顶空瓶中, 然后将样品置于水浴锅中在 45 °C 下孵化, 每次 20 min。电子鼻采集间隔为 1 s, 清洗时间为 60 s, 归零时间为 10 s, 预进样时间为 5 s, 采集时间为 120 s, 传感器仓流量为 300 mL/min, 初始注射流量为 300 mL/min。

传感器 W1C 对芳香成分、苯类敏感, W5S 对氮氧化合物敏感, W3C 对芳香成分、氨类敏感, W6S 主要对氢化物有选择性, W5C 对短链烷烃芳香成分敏感, W1S 对甲基类敏感, W1W 对硫化物灵敏, W2S 对醇类、醛酮类敏感, W2W 对芳香成分和有机硫化物敏感, W3S 对长链烷烃敏感。

1.2.5 SPME-GC-MS SPME 条件: 将乳化肠切碎, 精确称取 3.00 g 装入 20 mL 顶空瓶中, 加入 10 μL 浓度为 0.653 μg/kg 的邻氯二苯(溶剂为正己烷)作为内标物。

气相条件: 采用 TG-5SilMS GC 色谱柱(30 m×0.25 μm, 0.25 μm); 高纯氦气作为载气; 孵化温度为 60 °C, 萃取时间为 40 min。进样口温度 250 °C, 流速 1 mL/min, 不分流。升温程序: 起始温度 40 °C, 保持 2 min, 以 5 °C/min 升温速率升温至 60 °C, 10 °C/min 升温至 100 °C, 18 °C/min 升温至 240 保持 6 min。

质谱条件: 电子轰击(EI)离子源, 能量 70 eV; 离子源温度 280 °C, 传输线温度 250 °C, 扫描范围 35~500。

挥发性化合物的定性定量鉴定: 根据 Wiley 文库和美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)谱库对挥发性风味物质进行鉴定, 并通过保留指数(Retention index,

RI)进行定性分析。根据已知内标邻氯二苯含量对挥发性组分进行定量分析, 并依据化合物的峰面积比值与含量成正比的原理, 按式(1)计算出每一种风味化合物相对于内标化合物的含量:

$$C_x = C_0 \times V_0 \times \frac{S_x}{(m \times S_0)} \quad \text{式 (1)}$$

式中: C_x 为未知挥发性化合物含量, μg/kg; C_0 为内标化合物质量浓度, μg/μL; V_0 为内标化合物进样体积, μL; S_x 为未知挥发性化合物的峰面积, AU·min; S_0 为添加的内标化合物峰面积, AU·min; m 为试样的质量, kg。

1.2.6 气味活性值(Odorant Activity Value, OAV)

根据式(2)计算 OAV。

$$OAV = C/T \quad \text{式 (2)}$$

式中: C 为挥发性化合物含量, μg/kg; T 为嗅觉阈值, μg/kg。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 25 进行方差分析和显著性分析, 采用 MetaboAnalyst 进行主成分分析(PCA)、偏最小二乘判别分析(PLS-DA), 正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA), 采用 Origin2022 进行数据整理和作图。

2 结果与分析

2.1 不同熟化温度对乳化肠感官的影响

乳化肠的特征感官描述词最终被确定为肉香味、脂香味、硫磺味、哈喇味、青草味和蘑菇味, 8 组样品的感官评分结果如表 1 所示。在所有样品中, 肉香味、脂香味、硫磺味的评分较高, 青草味、蘑菇味和哈喇味评分较低。F 组样品中, F3 组肉香味评分最高, 这可能是因为 F1 组和 F2 组熟化温度低, 挥发性风味物质释放不完全^[5], 而 F4 组肉香味评分低于 F3 组可能是因为高温熟化所产生的其他气味掩盖了肉香味。其余 5 种感官属性评分均随熟化温度的升高而升高。在同一熟化温度下, 脂香味、硫磺味、哈喇味和青草味在 F 组样品中的评分高于 C 组。此外, 熟化时间相同, 熟化温度在 100 °C 以下时, F 组肉香味、蘑菇味评分高于 C 组, 但熟化条件为 121 °C, 20 min 时, F4 组乳化肠的肉香味、蘑菇味评分低于 C4 组, 这可能与脂肪在不同熟化条件下的氧化产物有关。

2.2 不同熟化温度对乳化肠电子鼻的影响

电子鼻(E-nose)是一种模拟人类嗅觉并输出混合气体或气味的“指纹”信息的测量仪器, 可用于识别不同样品之间的风味差异^[13]。根据传感器信号强度的大小, 绘制了乳化肠气味雷达图, 如图 1A 所示。图中显示了 8 个处理组的乳化肠对电子鼻 10 个传感器响应信号强度的大小, 除 W3S、W5S 和 W6S 三个传感器对乳化肠气味响应强度差异不显著外, 其余 7 个传感器的响应强度差异均显著, W2W

表1 不同乳化肠样本描述性感官评分(分)

Table 1 Descriptive sensory scores of different emulsified sausage samples (scores)

组别	肉香味	脂香味	硫磺味	哈喇味	蘑菇味	青草味
C1	8.06±1.7 ^b	5.89±3.11 ^c	4.11±2.75 ^b	1.81±0.39 ^b	2.72±1.44 ^a	2.67±1.54 ^b
C2	9.39±2.23 ^{ab}	6±2.98 ^{bc}	4.61±3.11 ^{ab}	2.06±0.68 ^b	3.03±1.58 ^a	3.47±2.25 ^{ab}
C3	9.28±2.59 ^{ab}	7.5±3.44 ^{bc}	5.39±3.7 ^{ab}	2.19±0.73 ^b	3.58±1.87 ^a	4±3.08 ^{ab}
C4	10.72±2.03 ^a	9.22±2.54 ^{ab}	7.28±3.79 ^{ab}	3.5±1.7 ^a	4.86±2.97 ^a	5.33±3.02 ^{ab}
F1	8.61±1.5 ^b	6.83±3.15 ^{bc}	4.72±3.04 ^{ab}	2±0.79 ^b	2.94±1.94 ^a	3.22±2.31 ^{ab}
F2	9.67±1.84 ^{ab}	8.56±3.39 ^{abc}	5.5±3.43 ^{ab}	2.11±0.96 ^b	3.39±2.4 ^a	3.83±2.59 ^{ab}
F3	11.22±1.52 ^a	9.22±3.46 ^{ab}	6.06±3.84 ^{ab}	2.64±1.36 ^{ab}	4.06±2.94 ^a	4.39±2.96 ^{ab}
F4	9.28±1.92 ^{ab}	10.83±2.22 ^a	8.06±3.92 ^a	3.5±2.06 ^a	4.16±2.32 ^a	5.72±3.41 ^a

注: 同一列不同小写字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

(对芳香烃、有机硫化物敏感)和 W1W(对硫化物敏感)传感器的响应强度差极显著。不同处理组乳化肠气味差异主要存在于芳香烃、硫化物、有机硫化物, 其次为苯类、氨基类、短链烷烃、甲基类、醇类、酮类等化合物, 而 W3S、W5S、W6S 传感器对应的敏感化合物氮氧化合物、碳氢化合物、长链烷烃, 8 个处理组样品无明显差异。

为进一步分析不同处理组乳化肠样品的气味组成差异, 对样品的电子鼻数据进行主成分分析(PCA)。如图 1B 所示, 主成分 1 和主成分 2 的方差总贡献率分别为 43.7% 和 17.9%, 能够反映样本的整体信息, 区分不同处理组间样品的气味差异。图 1B 中主成分 1 的方差贡献率大于主成分 2 的方差贡献

率, 表明样品在横坐标上距离越大, 其差异越明显; 而在纵坐标上即使样品间的距离很大, 由于主成分 2 的方差贡献率比较小, 其实际差异也不会很大。此外, 同一样品的数据点在横坐标、纵坐标上的聚集度较高, 表明同一样品的重复性和稳定性较好。根据图 1B 中样品点的分布状态可以得出, F3 组、F4 组均位于第四象限且分布区域较紧密, 特征气味相似; 由 F 组四个样品的组间对比可知, F 组的四个样品整体气味特征均有显著变化, 说明脂肪添加量相同的条件下, 升高熟化温度, 乳化肠的整体气味特征发生了显著性变化, 但当熟化温度为 100 °C 时其气味特征与 121 °C 相比差异不显著; C1 组与 F1 组均处于第二象限且分布区域较为接近, 气味相似, 说明采用 80 °C, 30 min 低温熟化时, 添加脂肪对乳化肠的整体气味影响不显著, 这可能是因为低温条件下美拉德反应以及脂质热降解不充分所致。C2 组与 F2 组, C3 组与 F3 组、C4 组与 F4 组在横坐标上的分布距离较远, 说明熟化条件为 90 °C, 30 min、100 °C, 30 min、121 °C, 20 min 时, 添加脂肪均会对乳化肠的整体气味特征产生显著影响。

2.3 不同熟化温度对乳化肠挥发性物质的影响

2.3.1 不同处理组挥发性物质及其含量 由表 2 可知, 8 个处理组共检测出 56 种挥发性化合物, 包括烃类、醛类、醇类、酮类、酯类、酚类和杂环类, 物质的种类与之前对猪肉乳化肠风味的研究一致^[14]。F 组样品共检测出 36 种挥发性物质, 其中烃类 11 种, 醛类 9 种, 醇类 4 种, 酮类 2 种, 酚类 2 种, 酯类 2 种、杂环类 6 种; C 组样品共检测出 46 种化合物, 其中烃类 19 种, 醛类 15 种, 醇类 3 种, 酮类 2 种, 酚类 2 种、酯类 2 种、杂环类 3 种。F1 组、F2 组、F3 组、F4 组分别检测出 13 种、23 种、25 种、27 种挥发性物质, 其总含量分别为 41.92、98.40、259.02、272.95 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 说明随着熟化温度的升高, 脂肪添加量为 30% 的乳化肠挥发性物质的总体含量呈上升趋势; C1 组、C2 组、C3 组、C4 组分别检测出 16 种、18 种、19 种、33 种挥发性物质, 其总含量分别为 28.14、33.35、39.86、182.79 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 物质含量显著低于 F 组($P<0.05$)。以上结果表明随着熟化温度的升

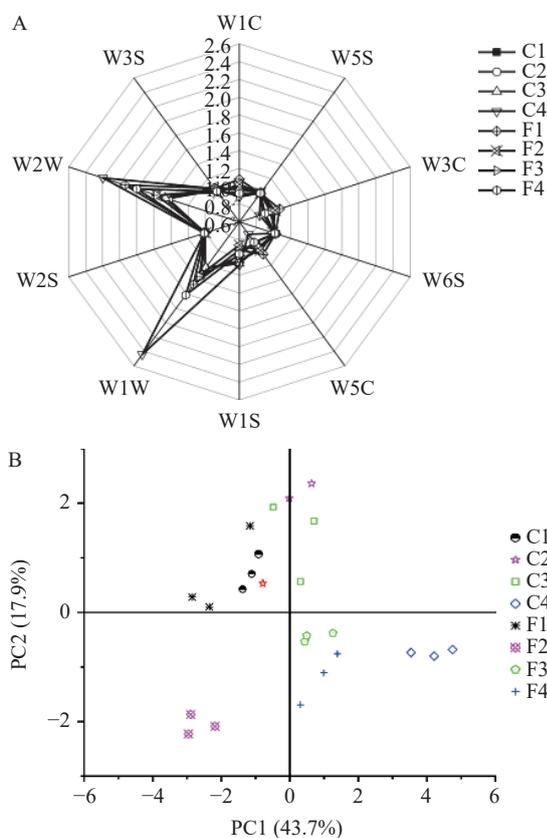


图1 乳化肠的电子鼻雷达图和PCA得分图

Fig.1 Electronic nose radar plot and PCA score plot of the emulsified sausage

注: A: 电子鼻雷达图; B: 电子鼻 PCA 得分图。

表 2 不同处理组乳化肠挥发物质含量
Table 2 Volatile content of emulsified sausages in different treatment groups

序号	名称	CAS号	含量(μg/kg)								RI ^b /RI ^c
			C1	F1	C2	F2	C3	F3	C4	F4	
V1	庚醛	111-71-7	0.61±0.27 ^{ab}	0.66±0.12 ^a	0.82±0.15 ^{ab}	3.22±1.08 ^b	0.6±0.29 ^{ab}	8.71±4.74 ^a	5.98±2.52 ^a	5.19±0.56 ^a	885/894
V2	壬醛	124-19-6	5.36±1.16 ^c	1.87±0.55 ^a	5.36±1.55 ^c	4.11±0.51 ^d	8.53±2.98 ^{bc}	5.62±1.74 ^{cd}	15.06±3.59 ^c	8.81±0.49 ^{ab}	1095/1087
V3	十六醛	629-80-1	—	—	—	—	0.28±0 ^a	—	2.45±0.61 ^b	—	1821/1817
V4	3,7-二甲基辛醛	5988-91-0	—	—	0.47±0.38 ^b	—	0.85±0.15 ^a	—	0.11±0.02 ^c	—	<700
V5	乙醛	75-07-0	—	—	—	—	—	—	1.03±0.46 ^a	—	<700
V6	丁二醛	638-37-9	—	—	—	—	—	1.13±0.35 ^a	0.91±0.79 ^a	1.59±0.27 ^a	<700
V7	戊醛	110-62-3	—	—	—	27.85±0.09 ^b	—	33.16±12.09 ^a	10.09±2.73 ^b	36.43±2.91 ^a	<700
V8	己醛	66-25-1	—	10.72±1.04 ^d	—	97.24±47.45 ^b	—	149.26±39.34 ^c	51.86±16.58 ^b	206.28±52.39 ^d	825/801
V9	苯甲醛	100-52-7	—	—	—	—	—	—	1.18±0.32 ^a	—	943/961
V10	辛醛	124-13-0	—	—	—	1.35±0.87 ^{bc}	—	5.47±0.85 ^{ab}	5.19±1.31 ^{ab}	3.18±0.2 ^a	1008/1004
V11	癸醛	112-31-2	—	—	—	—	—	—	0.12±0.04 ^a	—	1188/1188
V12	(E)-2-辛烯醛	2548-87-0	—	—	—	—	—	1.11±0.24 ^b	0.45±0.16 ^c	2.02±0.5 ^a	1050/1064
V13	(Z)-2-壬烯醛	60784-31-8	—	—	—	—	—	—	0.09±0.03 ^a	0.33±0.09 ^a	1141/1147
V14	(Z)-2-庚烯醛	57266-86-1	—	—	—	—	—	1.79±0.23 ^a	—	2.09±0.06 ^a	939/931
V15	(Z)-2-癸烯醛	2497-25-8	—	—	—	—	—	—	0.07±0.02 ^a	—	1246/1250
V16	十八醛	638-66-4	—	—	—	—	—	—	0.06±0.02 ^a	—	2077/—
V17	2,5-辛二酮	3214-41-3	—	—	—	—	—	40.52±1.74 ^a	51.7±8.11 ^b	29.56±0.8 ^c	970/—
V18	2-甲基-3-辛酮	923-28-4	—	—	—	8.66±2.86 ^a	—	—	—	—	969/—
V19	2-丁酮	78-93-3	—	—	—	—	—	—	1.85±0.3 ^a	—	<700/—
V20	反式-2,4-己二烯-1-醇	111-28-4	—	—	—	—	—	—	0.38±0.07 ^b	0.96±0.36 ^a	<700/—
V21	1-戊醇	71-41-0	—	—	—	3.26±1.53 ^b	—	9.98±1.1 ^a	1.74±0.5 ^{bc}	9.9±2.52 ^a	755/—
V22	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	—	—	—	2.66±1.23 ^c	—	12.62±1.49 ^b	24.17±7.89 ^a	12.95±0.75 ^a	964/978
V23	(Z)-2-辛烯-1-醇	26001-58-1	—	—	—	—	—	—	0.06±0.04 ^a	—	1053/1071
V24	4-氨基-1-戊醇	927-55-9	—	—	—	2.04±0.88 ^a	—	1.2±0.34 ^b	—	3.5±0.02 ^a	<700
V25	3-甲基-1,2-环戊二醇	27583-37-5	—	—	—	0.22±0.13 ^a	—	—	—	—	<700
V26	辛烷	111-65-9	6.28±0.24 ^a	—	—	—	12.4±2.85 ^b	—	—	—	<700
V27	乙苯	100-41-4	1.24±0.31 ^a	—	1.4±0.53 ^a	—	—	—	—	—	839/—
V28	癸烷	124-18-5	4.56±0.76 ^{bc}	10.09±1.23 ^a	6.8±2.5 ^b	2.69±0.5 ^{cd}	4.02±1.26 ^{cd}	1.53±0.28 ^d	2.48±0.67 ^{cd}	1.48±0.22 ^d	1000/1000
V29	十一烷	1120-21-4	0.56±0.05 ^a	0.83±0.13 ^a	0.63±0.02 ^a	0.74±0.21 ^a	0.61±0.16 ^a	—	0.66±0.04 ^a	—	1100/1100
V30	1-亚甲基茛	2471-84-3	0.25±0.01 ^b	1.01±0.71 ^a	0.1±0.04 ^b	0.3±0.07 ^b	0.28±0.06 ^b	0.23±0.01 ^b	0.28±0.13 ^b	—	1163/—
V31	6-甲基十八烷	10544-96-4	0.3±0.04 ^b	—	—	0.33±0.07 ^b	—	0.74±0.33 ^{ab}	—	1.1±0.07 ^a	1854/1847
V32	2,6,10-三甲基十四烷	14905-56-7	0.09±0.01 ^b	0.57±0.35 ^a	0.06±0.01 ^b	0.34±0.11 ^b	0.07±0.01 ^b	0.75±0.16 ^b	0.07±0.02 ^b	0.12±0.01 ^b	1579/1557
V33	1-辛烯	111-66-0	0.55±0.03 ^b	—	—	—	1.39±0.38 ^a	—	—	1.36±0.62 ^a	747/—
V34	3-亚甲基-庚烷	1632-16-2	0.59±0.01 ^b	—	0.62±0.2 ^b	—	1.58±0.44 ^a	—	—	—	742/764
V35	3-甲基-癸烷	13151-34-3	0.24±0 ^a	—	—	—	—	—	—	—	1055/1070
V36	2-甲基-丁烷	78-78-4	—	—	0.94±0.16 ^a	—	1.59±0.04 ^b	—	1.59±0.04 ^b	—	<700/477
V37	2,4-二甲基己烷	589-43-5	—	—	9.41±3 ^a	—	—	—	—	—	717/726
V38	十二烷	112-40-3	—	—	0.49±0.03 ^a	—	0.81±0.01 ^b	—	—	—	1200/1200
V39	2-氯辛烷	628-61-5	—	2.30±1.23 ^a	0.78±0.16 ^{ab}	1.2±0.59 ^a	—	1.37±0.17 ^a	0.45±0.19 ^b	—	747/—
V40	庚烷	142-82-5	—	—	—	—	0.49±0.08 ^a	—	—	—	700/700
V41	甲基-环己烷	108-87-2	—	3.42±0.86 ^b	—	—	0.8±0.23 ^a	—	—	—	<700
V42	2-乙基-4-甲基-1-戊烯	3404-80-6	—	—	—	—	—	0.5±0.08 ^a	0.54±0.2 ^a	0.47±0.1 ^a	742/745
V43	亚硝基甲烷	865-40-7	—	1.02±0.20 ^a	—	—	—	—	—	—	<700
V44	3-辛烯	14850-22-7	—	5.22±2.24 ^a	—	3.68±3.45 ^a	—	—	—	—	808/811
V45	1-氯-3-甲基丁烷	56554-43-9	—	—	—	0.45±0.07 ^a	—	1.31±0.18 ^a	—	—	713/—
V46	1,2-环氧十一烷	17322-97-3	—	—	—	—	—	—	—	0.08±0.00 ^a	1188/—

续表 2

序号	名称	CAS号	含量(μg/kg)								RI ^b /RI ^c
			C1	F1	C2	F2	C3	F3	C4	F4	
V47	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	0.14±0.01 ^b	3.87±0.82 ^a	0.15±0.02 ^b	0.54±0.09 ^b	0.24±0.06 ^b	0.77±0.21 ^b	0.07±0.02 ^b	0.63±0.05 ^b	1530/1513
V48	2,6-双(1,1-二甲基乙基)-4-(1-氧代丙基)苯酚	1883-13-2	0.05±0 ^b	0.33±0.05 ^a	0.04±0.01 ^b	0.08±0.02 ^b	0.05±0.01 ^b	0.07±0.01 ^b	0.04±0.01 ^b	0.09±0.04 ^b	1697/-
V49	(2-氨基乙基)氮丙啶	4025-37-0	2.1±0.29 ^b	-	-	3.48±0.93 ^a	-	-	1.35±0.36 ^c	-	<700
V50	甲硫醇	74-93-1	-	-	-	-	-	-	0.72±0.21 ^a	-	<700
V51	O-甲基异脲	2440-60-0	-	-	-	-	-	-	0.43±0.24 ^a	0.69±0.04 ^a	<700
V52	N,N-二丁基甲酰胺	761-65-9	-	2.16±0.55 ^a	-	2.16±0.55 ^a	-	0.69±0.27 ^b	-	0.66±0.04 ^b	1778/1773
V53	胍甲酸苯甲酯	5331-43-1	0.31±0.1 ^a	-	0.39±0.16 ^a	-	0.76±0.44 ^a	-	-	-	<700
V54	n-己酸乙酯	3050-69-9	-	-	-	0.94±0.08 ^b	-	50.98±4.32 ^a	-	51.03±10.2 ^a	969
V55	亚硝酸仲丁酯	924-43-6	0.76±0.22 ^a	-	-	-	-	-	-	-	582/542
V56	3,6-十八碳二烯酸甲酯	56554-43-9	-	-	-	0.24±0.02 ^a	-	-	-	-	702/-

注：“-”代表物质未检出、或未检索到RI值；同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)；RI^b代表RI计算值；RI^c代表RI文献参考值；RI文献参考值数据来源Flavormet以及NIST Chemistry WebBook；每个样品均重复测定3次，结果均为均值±标准误差。

高，添加/不添加脂肪的乳化肠处理组的挥发性物质含量均呈上升趋势，但是添加脂肪会使乳化肠的挥发性物质总量显著升高。

醛类物质主要来自不饱和脂肪酸的自氧化和酶促氧化^[15]，由于阈值较低，是肉类气味的重要组成部分^[16]。由图2可知，升高温度和添加脂肪均使乳化肠挥发性化合物的种类和含量发生变化。添加脂肪的4个处理组中，醛类物质在F2组、F3组、F4组中含量均是最高的，占本组挥发性物质总含量之比均超过70%，且随着熟化温度的升高而增加，F4组含量最高，说明高温促进了脂肪的大量氧化降解。何苗等^[17]研究显示，在高温杀菌条件下福建风味鸭的醛类物质含量随温度的升高而升高，与本文研究结果一致；C组乳化肠中醛类物质种类和含量均随着熟化温度的升高而增加，但含量显著低于F组，这可能是高温促进瘦肉中的磷脂氧化降解，导致C组乳化肠醛

类物质含量和种类增加^[18-19]。由表2可知，乳化肠中主要的醛类物质是己醛、庚醛、壬醛、戊醛、辛醛和苯甲醛。有研究表明，辛醛、壬醛、庚醛是油酸均裂降解的产物^[20]，己醛、戊醛来源于亚油酸的氧化降解^[21]，亚麻酸氧化降解的产物则主要是苯甲醛^[22]，这些化合物与Yin等^[23]对哈尔滨红肠风味的研究结果一致。

醇类化合物主要来自于不饱和脂肪酸的氧化降解^[24]。C组、F组中醇类物质的种类和含量随着熟化温度的升高而升高，F4组、C4组的醇类化合物含量显著高于其他组($P<0.05$)，这是因为高温热处理极大的促进了脂肪的氧化降解。相同熟化温度下，C组醇类物质的种类和总含量低于F组，但含量最高的1-辛烯-3-醇在F4组中的含量明显低于C4组，这可能是因为脂肪作为亲脂化合物的溶剂，降低了1-辛烯-3-醇的蒸气压，从而抑制其释放。Ventanas等^[25]的研究也证明了高脂乳化肠中的1-辛烯-3-醇含量显著低于低脂乳化肠。

酮类物质的含量受到熟化温度和脂肪的影响而产生变化。在F组乳化肠中随着熟化温度的升高酮类物质的含量先上升后下降，在F3组中含量最高。相同熟化温度下，F组乳化肠中的酮类物质含量比相应的C组含量高。2,5-辛二酮是乳化肠中含量最多的酮类物质。在添加脂肪的4个处理组中仅F3组和F4组检测出2,5-辛二酮，并且随着熟化温度的升高而显著降低($P<0.05$)，这是因为2,5-辛二酮作为羰基化合物可能会与蛋白质、氨基酸和肽等物质发生反应，导致含量损失^[26]。C组乳化肠中只有C4组检测出2,5-辛二酮且含量显著高于F4组($P<0.05$)，这可能是因为121℃、20min的高温条件下，脂质氧化产物会与美拉德反应所产生的酮类化合物反应^[27]，使乳化肠中的酮类物质含量显著下降($P<0.05$)。

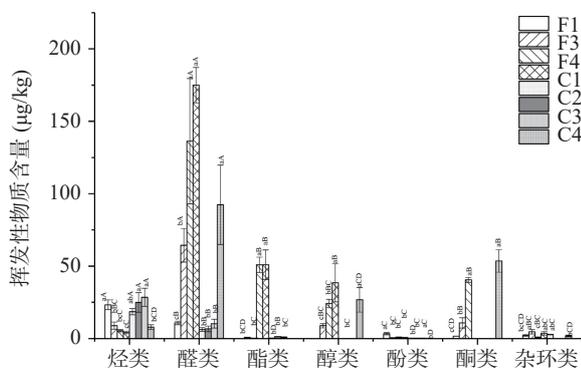


图2 不同处理组中挥发性物质种类及含量

Fig.2 Species and content of volatile substances in different treatment groups

注：小写字母不同表示同类挥发性物质不同处理组之间差异显著($P<0.05$)，大写字母不同表示同处理组不同种类挥发性物质之间差异显著($P<0.05$)。

烃类化合物是除醇类和醛类之外含量最高一类物质, 但因其阈值较高, 对乳化肠的香气贡献极小。酯类物质虽然含量较高, 但是并未检索到相关的阈值及嗅觉特性, 所以认为其本身对乳化肠的整体气味贡献不大。含硫、含氮的杂环类化合物虽然含量较少但因其阈值较低因而对肉制品的香气产生显著的影响^[28]。除此之外, 乳化肠中检测到的阈值较小的化合物是甲硫醇, 它主要来源于硫胺素的热降解^[29], 具有硫磺味、大蒜味、烂卷心菜味。

2.3.2 挥发性物质 OAV 分析 为了评估单个挥发性化合物对不同处理组乳化肠的整体香气特征的贡献, 计算了它们的气味活性值(OAV), 如表 3 所示。OAV>1 的挥发性化合物有 8 种, 包括 5 种醛类物质, 2 种烃类物质, 1 种醇类物质。己醛在 F 组样品中具有较高的 OAV 水平(OAV 为 2.38~45.84), 对 F 组所有乳化肠样品的香气特征有较大贡献。壬醛在 C 组样品中具有较高的 OAV 水平(OAV 为 5.36~15.06), 对 C 组所有乳化肠样品的香气特征有较大贡献。

此外, 在 F 组乳化肠中, 一些醛类物质如庚醛(脂香味, 柑橘味)、辛醛(脂香, 皂香)、戊醛(青草味, 脂香)以及醇类物质如 1-辛烯-3-醇(蘑菇味), 1-戊醇(香油味)在 F1 组未检测到, 并且随着熟化温度的升高其 OAV 水平升高, 表明随着熟化温度的升高 F 组乳化肠中青草味, 油脂味和蘑菇味对整体风味的贡献增大。Han 等^[31]研究发现采用高温炖煮的红烧肉比传统炖煮红烧肉的 OAV 值更高, 与本文研究结果相一致。通常情况下, 上述化合物在适宜的浓度下呈献出令人愉悦的香气, 是熟肉制品香气的重要组成部分, 但在高浓度时呈现出令人难以接受的味道, 比如己醛在适宜浓度时呈现出青草香气, 高浓度时则会产生油败味^[26], 这可能是造成 F4 组油脂味和哈喇味感官评分较高的原因。

相同熟化条件下, F 组中 OAV>1 的化合物种类多于 C 组, 且差异物质多为醛类物质, 因此 F 组乳化肠相较于 C 组脂香味、青草味、哈喇味的感官评分更高, 与感官结果相一致, 这可能是因为脂肪在热加工过程中产生的脂质氧化产物与氨基酸残基或者美拉德反应产物相互作用, 导致乳化肠感官属性评分改变。此外, 1-辛烯-3-醇也是 C 组和 F 组的主要差异化合物, 通常被认为是花生四烯酸第 12 位碳上的氢过氧化物裂解产生的辛烯基团与氧反应生成辛烯基氧自由基, 辛烯基氧自由基捕获质子生成, 具有特殊的蘑菇香和油脂香气^[32]。1-辛烯-3-醇在 F4 组中的 OAV(OAV=12.95)明显低于 C4 组(OAV=24.17), 因此, C4 组的蘑菇味更强烈, 与感官评价结果相一致。

2.4 挥发性物质的多元统计分析

2.4.1 基于挥发性物质含量的 PCA 分析 对各组挥发性物质进行主成分分析(PCA), PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 88.1% 和 6.9%, 累计贡献率达到 95%, 说明 2 个主成分已经包含了大量信息, 能够充分反映样本的整体信息。图 3 中 PC1 的主成分贡献率远大于 PC2, 表明在样品间在横坐标上的距离即使较小, 其实际差异可能也较为明显。从图 3 可以看出 F3 组与 F4 组样品点分布范围交叠在一起, 而 F 组其他处理组两两之间无交叠, 且在横坐标上分布距离较远, 说明 F 组乳化肠中 F3 与 F4 两组挥发性物质相似, 其他处理组两两之间挥发性物质存在明显差异。对比 F 组和 C 组 PCA 可知, F1 与 C1 交叠在一起, F2 与 C2、F3 与 C3、F4 与 C4 在横坐标上分布较远且无交叠, 说明 F1 与 C1 的挥发性风味物质差异不大, 上述其它组之间的挥发性风味物质差异明显。综上所述, 熟化时间相同, 熟化温度低于 100 °C 时, 升高熟化温度, 乳化肠的整体气味特征发生了显著性变化, 而熟化条件为 100 °C, 30 min 与 121 °C, 20 min 时, 挥发性物质差异不显著, 该结果与

表 3 不同处理组乳化肠挥发性物质的 OAV 值

Table 3 OAV values of volatiles from emulsified sausages in different groups

名称	阈值 (μg/kg) ^[30]	C1	F1	C2	F2	C3	F3	C4	F4	气味描述
己醛	4.50	-	2.38	-	21.61	-	32.50	11.52	45.84	清香、叶香、果香、木香
庚醛	3.00	0.20	-	0.27	1.07	0.20	2.90	1.99	1.73	脂香、柑橘香、酸败气味
辛醛	0.70	-	-	-	1.93	-	7.81	7.42	4.54	脂香、皂香、柠檬、青草香
戊醛	20.00	-	-	-	0.49	-	1.66	0.50	12.52	黄瓜、脂香、青草香
壬醛	1.00	5.36	-	5.36	4.11	8.53	5.62	15.06	8.81	脂香、柑橘香、青草香
苯甲醛	350.00	-	-	-	-	-	-	0.00	-	苦杏仁、焦糖香
癸醛	4.90	-	-	-	-	-	-	0.03	-	肥皂、柑橘、牛油
(Z)-2-辛烯醛	3.00	-	-	-	-	-	-	0.15	0.67	脂香、坚果香、青草香
1-辛烯	0.50	1.09	-	-	-	2.77	-	-	2.72	烷烃气味
癸烷	10000.00	0.00	0.01	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00	烷烃气味
1-辛烯-3-醇	1.00	-	-	-	2.66	-	12.62	24.17	12.95	蘑菇香、泥土味
1-戊醇	150.20	-	-	-	0.02	-	0.07	0.01	0.07	香油样气味
2,4-己二烯-1-醇	50.00	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-
甲硫醇	0.20	-	-	-	-	-	-	3.58	-	硫磺味、大蒜味、烂卷心菜味

注:“-”代表未检出;对挥发性物质香气的描述来源于<http://www.flavornet.org/flavornet.html>。

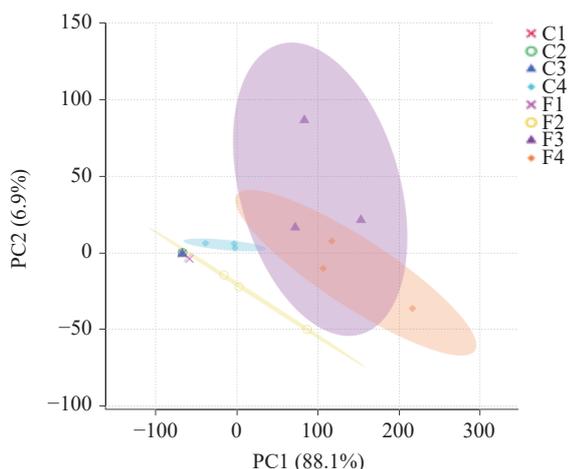


图3 乳化肠挥发性化合物 PCA 得分图

Fig.3 PCA score of volatile compounds in emulsified sausage

电子鼻结果相一致。

2.4.2 偏最小二乘判别分析 为进一步分析不同熟化温度对 F 组乳化肠挥发性风味化合物的影响并获得差异化合物,基于表 2 中 F 组乳化肠的 36 种挥发性风味化合物,运用偏最小二乘判别分析(PLS-DA)分析熟化温度与 F 组乳化肠挥发性风味物质之

间的关系。由图 4a 得分图可知,4 种不同熟化温度的乳化肠可明显的区分,其中, F1、F2、F3、F4 分别位于第三、第二、第四、第一象限且互不交叠,说明不同熟化温度可使乳化肠挥发性物质种类或含量存在差异。PLS-DA 模型中 R^2 代表拟合能力, Q^2 代表预测能力,以大于 0.5 为佳,越接近于 1 越好^[33]。采用交叉验证法对模型进行验证,拟合指数 $R^2=0.970$, $Q^2=0.859$,表明该模型稳定性好,具有较好的预测能力。为了筛选出对区分不同熟化温度的样品组具有贡献的显著成分,通过 PLS-DA 模型的 VIP(Variable Importance in Projection)值进行进一步分析贡献变量指标。VIP 表示对变量的贡献率,值越大贡献越大^[34]。VIP>1 的化合物可作为标志差异物^[35],以此为界限进行筛选,可以得到己醛(V8)、戊醛(V7)、n-己酸乙烯酯(V56)等 3 个化合物为不同熟化温度乳化肠气味差异贡献度较大的挥发性风味化合物(图 4b),即这 3 种化合物是导致不同熟化温度乳化肠气味差异的潜在标志物。在乳化肠加工过程中可以通过控制这些差异性物质获得风味较好的乳化肠,这对乳化肠熟化温度的选择以及风味调控具有指导意义。

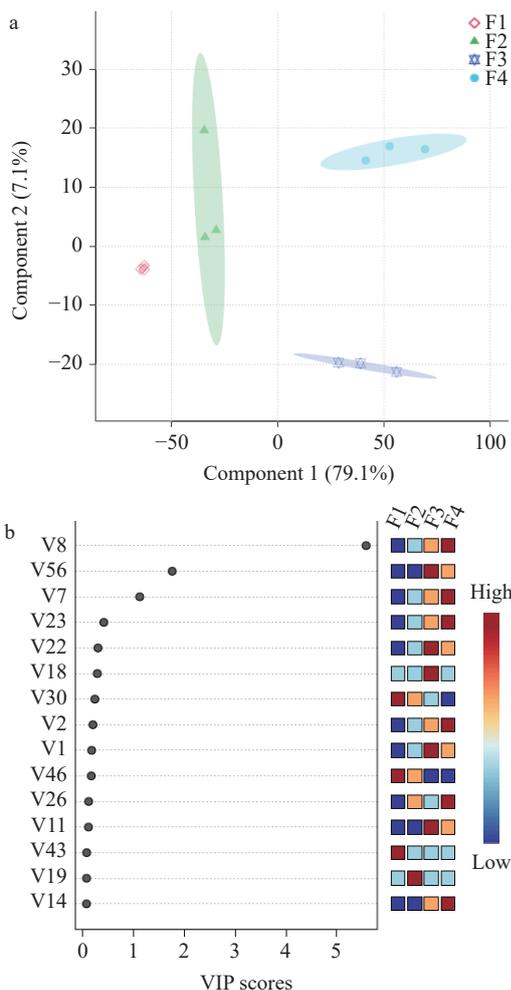


图4 乳化肠 PLS-DA 分析图

Fig.4 PLS-DA analysis of emulsified intestine

注: a: PLS-DA 得分图; b: VIP 图。

2.4.3 正交偏最小二乘判别分析 利用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)基于降维原理简化数据后对 GC-MS 数据进行可视化处理,可区分不同组别间的特征挥发性化合物。相较于 PLS-DA, OPLS-DA 通常是将组别进行两两比较,进一步放大组间差异。如图 5 所示,构建 4 个 OPLS-DA 模型用以判别熟化温度分别为 80、90、100、121 °C 时由于添加脂肪所产生的标志性挥发性成分,4 个不同熟化温度下添加脂肪的乳化肠和纯瘦肉肠都可以根据模型进行很好的区分。通常使用 R_x^2 (cum), R_y^2 (cum), Q^2 (cum) 对模型进行评估。

R_y^2 (cum) 是模型解释因变量的累计方差值, Q^2 (cum) 代表累计交叉有效性,可以评价模型的预测能力。 R_x^2 (cum) 与参数有关,是针对特定成分建模的累计方差值,所有这些值的范围都在 0~1 之间,越接近 1 表示模型的拟合效果更好,高于 0.4 则表示该模型可以接受, Q^2 (cum)>0.5 则说明该模型具有良好的预测能力^[36-37]。4 组模型的 R_x^2 (cum) 分别为 0.845、0.748、0.811、0.7034, R_y^2 (cum) 分别为 0.995、0.998、0.981、0.969, Q^2 (cum) 分别为 0.985、0.975、0.971、0.941。 R_x^2 、 R_y^2 、 Q^2 值均在 0.7~1.0 之间,说明这些模型的拟合效果较好且预测能力较强,用于分析标志性化合物可靠。

根据 VIP>1 可以区分出不同组别的标志物质。熟化温度为 80 °C, 30 min 时, C1 组和 F1 组的差异性物质有 17 种(图 5b), 主要是烃类、醛类和酚类化合物;熟化温度为 90 °C, 30 min 时, C2 组和 F2 组的差异性物质有 17 种(图 5d), 主要为烃类、醇

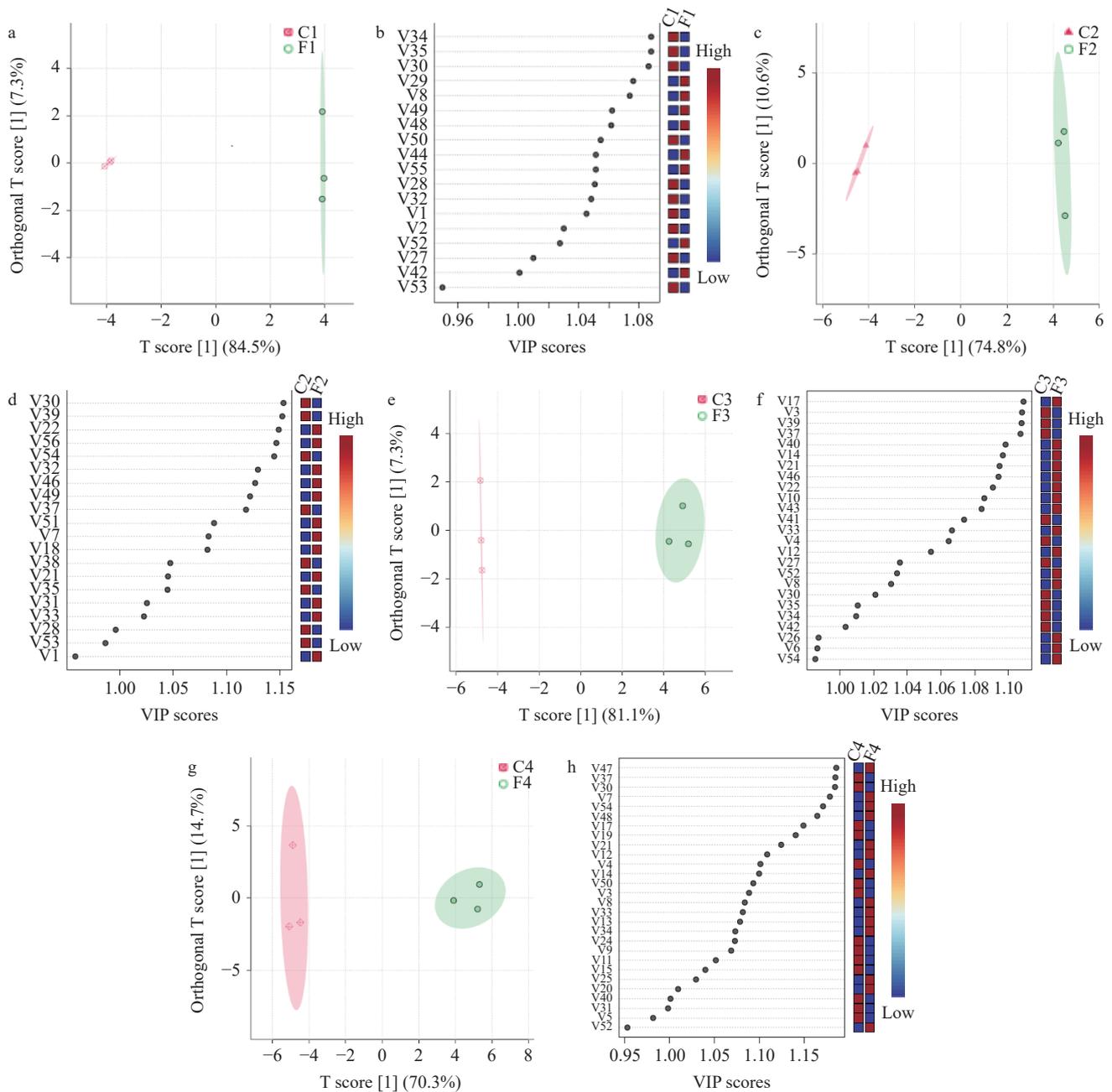


图 5 乳化肠的 OPLS-DA 分析

Fig. 5 OPLS-DA analysis of emulsified sausage

注: a-b 为熟化温度为 80 ℃, 30 min 时乳化肠的 OPLS-DA 得分图和 VIP 图; c-d 为熟化温度为 90 ℃, 30 min 时乳化肠的 OPLS-DA 得分图和 VIP 图; e-f 为熟化温度为 100 ℃, 30 min 时乳化肠的 OPLS-DA 得分图和 VIP 图; g-h 为熟化温度为 121 ℃, 20 min 时乳化肠的 OPLS-DA 得分图和 VIP 图。

类和酯类化合物; 熟化温度为 100 ℃, 30 min 时, C3 组和 F3 组的差异性化合物有 22 种(图 5f), 主要为烃类、醛类和醇类化合物; 熟化条件为 120 ℃, 20 min 时, C4 组和 F4 组的差异性化合物有 25 种(图 5h), 主要为醛类、烃类和醇类。以上结果表明, 熟化温度在 100 ℃ 及以下时, C 组和 F 组样品的差异化合物中种类最多的为烃类物质, 熟化温度为 121 ℃ 时差异化合物中种类最多的是醛类物质。在乳化肠的加工过程中可以通过控制这些差异物质调节脂肪的添加量, 为乳化肠的风味调控提供精细化指导。

3 结论

本实验研究了添加脂肪和不添加脂肪的两种猪肉乳化香肠在 4 种熟化条件(80 ℃, 30 min、90 ℃, 30 min、100 ℃, 30 min 和 121 ℃, 20 min)下的挥发性物质的变化。熟化条件为 80 ℃, 30 min 的乳化肠挥发性物质种类和含量较少, 香气不突出。熟化条件为 121 ℃, 20 min 的乳化肠挥发性物质种类和含量最多, 但哈喇味、硫磺味等异味感官属性最强。采用 100 ℃, 30 min 熟化条件的乳化肠无明显异味且肉香味评分最高; 添加脂肪显著增加了乳化肠在中温、高温熟化条件下的挥发性物质含量, 但提高了高温乳

肠的异味强度。本实验对乳化肠的挥发性物质指标进行了较为全面的测定,且感官评价、电子鼻和 GC-MS 结果较为一致,说明熟化条件为 100 °C, 30 min, 添加脂肪的乳化肠风味更佳。此外,本研究尚未涉及不同品种的原料肉对乳化肠挥发性物质的影响,因此,在后续的研究中,可以深入探讨在 100 °C, 30 min 的熟化条件下,不同品种的原料肉对乳化肠挥发性物质的影响,旨在进一步改善乳化肠的风味,开发更多具有特色的乳化肠产品。

参考文献

- [1] 周慧敏, 赵燕, 任双, 等. 杀菌温度对乳化肠中脂肪酸组成和脂肪氧化的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 26-31. [ZHOU H M, ZHAO Y, REN S, et al. Effect of sterilization temperature on fatty acid composition and fat oxidation in emulsified sausages[J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 26-31.]
- [2] 韩宏娇. 低温香肠常温贮藏期间的品质变化规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. [HAN Hongjiao. Study on quality changes of low-temperature sausages during ambient storage[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.]
- [3] 李素, 张顺亮, 潘晓倩, 等. 中温乳化肠中凝结芽孢杆菌芽孢萌发及热致死规律[J]. *肉类研究*, 2017, 31(4): 10-16. [LI S, ZHANG S L, PAN X Q, et al. Germination of *Bacillus coagulans* in medium-temperature emulsified sausages and the pattern of thermogenic death[J]. *Meat Research*, 2017, 31(4): 10-16.]
- [4] 艾婷, 张顺亮, 王守伟, 等. 中温杀菌对乳化肠挥发性风味物质变化的影响[J]. *肉类研究*, 2014, 28(12): 6-9. [AI Ting, ZHANG Shunliang, WANG Shouwei, et al. Effect of medium-temperature sterilization on changes of volatile flavor substances in emulsified sausages[J]. *Meat Research*, 2014, 28(12): 6-9.]
- [5] 罗奎, 于淑娟, 李延军. 影响肉制品风味形成的因素[J]. *肉类工业*, 2005(3): 1-5. [LUO Kui, YU Shujuan, LI Yanjun. Factors affecting flavor formation of meat products[J]. *Meat Industry*, 2005(3): 1-5.]
- [6] 任晶晶. 抗性淀粉对低脂低盐乳化肠风味的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. [REN Jingjing. Effect of resistant starch on the flavor of low-fat and low-salt emulsified sausages[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.]
- [7] 刁小琴, 王莹, 贾瑞鑫, 等. 动物性脂肪对肉品风味影响机制研究进展[J]. *肉类研究*, 2022, 36(3): 45-51. [DIAO Xiaoqin, WANG Ying, JIA Ruixin, et al. Research progress on the mechanism of animal fat on meat flavor[J]. *Meat Research*, 2022, 36(3): 45-51.]
- [8] 朱文政, 刘薇, 季明勇, 等. 不同肥瘦比和烹制时间对狮子头猪肉丸特征挥发性风味成分的影响[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(6): 257-66, 159. [ZHU Wenzheng, LIU Wei, JI Mingyong, et al. Effects of different fat-to-lean ratios and cooking times on the characteristic volatile flavor components of lion's head pork balls[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(6): 257-66, 159.]
- [9] ZHAO B, ZHOU H M, ZHANG S L, et al. Changes of protein oxidation, lipid oxidation and lipolysis in Chinese dry sausage with different sodium chloride curing salt content[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2020, 9(4): 328-337.
- [10] 王春晓, 周凯, 张健, 等. 松乳菇对低脂乳化肠质构品质的影响[J]. *肉类研究*, 2022, 36(5): 42-48. [WANG Chunxiao, ZHOU Kai, ZHANG Jian, et al. Influence of mushrooms on the textural quality of low-fat emulsified sausages[J]. *Meat Research*, 2022, 36(5): 42-48.]
- [11] BYRNE D V, O'SULLIVAN M G, DIJKSTERHUIS G B, et al. Sensory panel consistency during development of a vocabulary for warmed-over flavour[J]. *Food Quality and Preference*, 2001, 12(3): 171-187.
- [12] HAN D, ZHANG C H, FAUCONNIER M L, et al. Characterization and differentiation of boiled pork from Tibetan, Sanmenxia and Duroc x (Landrac x Yorkshire) pigs by volatiles profiling and chemometrics analysis[J]. *Food Research International*, 2020(130): 108910.
- [13] CHENG L, MENG Q H, LILIENTHAL A J, et al. Development of compact electronic noses: A review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(6): 062002.
- [14] 张玉梅, 董铭, 邓绍林, 等. 菊粉对低脂乳化肠质构及风味品质的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(12): 2769-2779. [ZHANG Yumei, DONG Ming, DENG Shaolin, et al. Effect of inulin on the texture and flavor quality of low-fat emulsified sausage[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2020, 34(12): 2769-2779.]
- [15] 杨姣, 安玥琦, 陈雨欣, 等. 鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 265-280. [YANG Jiao, AN Yueqi, CHEN Yuxin, et al. Characterization of flavor components of overcooked flavor during heating of surimi products[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 265-280.]
- [16] WU N, WANG X C. Identification of important odorants derived from phosphatidylethanolamine species in steamed male Eriocher sinensis hepatopancreas in model systems[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 491-499.
- [17] 何苗, 陈洁, 曾茂茂, 等. 高温杀菌对福建风味鸭风味的影响[J]. *食品与机械*, 2014, 30(3): 29-34. [HE Miao, CHEN Jie, ZENG Maomao, et al. Effect of high-temperature sterilization on the flavor of Fujian-style duck[J]. *Food and Machinery*, 2014, 30(3): 29-34.]
- [18] ZANG M W, WANG L, ZHANG Z Q, et al. Changes in flavour compound profiles of precooked pork after reheating (warmed-over flavour) using gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry with chromatographic feature extraction[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 55(3): 978-987.
- [19] ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, et al. Effects of phospholipids and reheating treatment on volatile compounds in phospholipid-xylose-cysteine reaction systems[J]. *Food Research International*, 2021(139): 109918.
- [20] ZHANG Q, QIN W, LIN D R, et al. The changes in the volatile aldehydes formed during the deep-fat frying process[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2015, 52(12): 7683-7696.
- [21] VARLET V, PROST C, SEROT T. Volatile aldehydes in smoked fish: Analysis methods, occurrence and mechanisms of formation[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(4): 1536-1556.
- [22] KONOPKA U C, GUTH H, GROSCH W. Potent odorants formed by lipid-peroxidation as indicators of the warmed-over flavor (wof) of cooked meat[J]. *Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung*, 1995, 201(4): 339-343.
- [23] YIN X Y, LÜ Y C, WEN R X, et al. Characterization of selected Harbin red sausages on the basis of their flavour profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue[J]. *Meat Science*, 2021(172): 108345.
- [24] ZENG X F, XIA W S, JIANG Q X, et al. Contribution of mixed starter cultures to flavor profile of suanyu-A traditional chinese low-salt fermented whole fish[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(5): e13131.

- [25] VENTANAS S, PUOLANNE E, TUORILA H. Temporal changes of flavour and texture in cooked bologna type sausages as affected by fat and salt content[J]. *Meat Science*, 2010, 85(3): 410-419.
- [26] DUAN Z L, DONG S L, SUN Y X, et al. Response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) flavor to environmental salinity while culturing between freshwater and seawater[J]. *Aquaculture*, 2021 (530): 735953.
- [27] 夏延斌. 食品风味化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 90-91. [XIA Yanbin. Food flavor chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 90-91.]
- [28] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: A review[J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415-424.
- [29] KHAN M I, JO C, TARIQ M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors-A systematic review[J]. *Meat Science*, 2015(110): 278-284.
- [30] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 李智宇, 王凯, 冒德寿, 译. 北京: 科学出版社, 2015. [VAN H L. Compilation of olfactory thresholds for compounds [M]. LI Z Y, WANG K, MAO D S, Trans. Beijing: Science Press, 2015.]
- [31] HAN D, ZHANG C H, FAUCONNIER M L, et al. Characterization and comparison of flavor compounds in stewed pork with different processing methods[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021(144): 111229.
- [32] MOTTRAM D S, CROFT S E, PATTERSON R L. Volatile components of cured and uncured pork: The role of nitrite and the formation of nitrogen compounds[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1984, 35(2): 233-239.
- [33] 郭斐, 李如玉, 苏晓霞, 等. 建宁莲子挥发性风味化合物分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(21): 6862-6869. [GUO Fei, LI Ruyun, SU Xiaoxia, et al. Analysis of volatile flavor compounds in Jianning lotus seeds[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2022, 13(21): 6862-6869.]
- [34] 吴荣梅, 滑金杰, 袁海波, 等. 不同毛火程度绿茶的品质成分及感官风味比较[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(9): 298-307. [WU Rongmei, HUA Jinjie, Yuan Haibo, et al. Comparison of quality components and sensory flavors of green teas with different degrees of hair fire[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(9): 298-307.]
- [35] 冯瑶, 樊一鸣, 任洪利, 等. 炒制时间对不同复配比例黑皮鸡枞菌-平菇复合酱风味的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 275-282. [FENG Yao, FAN Yiming, REN Hongli, et al. Effect of frying time on the flavor of black-skinned Chanterelle mushroom-ping mushroom compound sauce with different compounding ratios[J]. *Food Science*, 2022, 43(20): 275-282.]
- [36] 李明洁, 凌道, 李祥雨, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析海鸭蛋腌制过程中蛋清挥发性风味物质的变化[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 200-208. [LI Mingjie, LING Xiao, LI Xiangyu, et al. Changes of volatile flavor substances in egg whites during the curing process of sea duck eggs based on gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2022, 43(18): 200-208.]
- [37] ARROYO-MANZANARES N, GARCÍA-NICOLÁS M, CASTELL A, et al. Untargeted headspace gas chromatography-Ion mobility spectrometry analysis for detection of adulterated honey [J]. *Talanta*, 2019(205): 120123.